

2. Баскаков А.П. Физико-химические основы тепловых процессов / А.П. Баскаков, Ю.В. Волкова. – М.: Теплотехник, 2013. – 173 с.
3. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
4. Hernandez J. Gasification of biomass wastes in an entrained flow gasifier: Effect of the particle size and the residence time / J. Hernandez et al. // Fuel Processing Technology. – 2010. – Vol. 91. – P. 681–692.
5. Kiso F. A simulation study on the enhancement of the shift reaction by water injection into a gasifier / F. Kiso, M. Matsuo // Energy. – 2011. – Vol. 36. – P.4032–4040.

УДК 662.76

А. О. Овчарников, Н. А. Абаимов, А. Ф. Рыжков

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ КОКСА КАМЕННОГО УГЛЯ В ПРИБОРЕ ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Аннотация

Для повышения эффективности работы оборудования металлургической промышленности необходимо изучать кинетические характеристики одного из главного сырья – кокса. Термогравиметрический анализ (ТГА) позволяет проводить такие исследования характеристик твердого топлива. Прибор ТГА (в частности печь) конструктивно сложен и не позволяет экспериментально определять некоторые важные параметры процесса, такие как аэродинамические особенности и распределение газов в объеме печи. Данные параметры, как правило, определяют методом вычислительной гидродинамики (CFD). В данном докладе моделировался сегмент внутреннего, а также пространства, омывающего сам тигель. Моделировались моменты горения при температурах 491 °С, 700 °С и 907 °С, система считалась изотермичной. Сравнение результатов, полученных для этих трёх случаев, позволило установить характер концентрационных полей каждого из газов.

Ключевые слова: термогравиметрический анализ (ТГА), вычислительная гидродинамика (CFD), кокс угля, кинетика химических реакций, ламинарное течение.

Abstract

Efficiency improvement of the metallurgical industry equipment requires research of coke kinetic characteristics. Thermal gravimetric analysis (TGA) allows such studies of solid fuel characteristics. TGA instrument (particularly bake) structurally complicated and does not allow to experimentally determining some important process parameters such as aerodynamic characteristics, and distribution of gases in the kiln volume. These parameters are generally determined by computational fluid dynamics (CFD). In this report, the segment of the crucible interior, as well as the space that was washing the crucible itself, was modeled. The moments of combustion at temperatures of 491 °C, 700 °C and 907 °C were simulated, the system was considered isothermal. A comparison of the results obtained for these three cases made it possible to establish the character of the concentration fields of each of the gases.

Keywords: thermal gravimetric analysis (TGA), computational fluid dynamics (CFD), coal coke, chemical reaction kinetic, laminar flow.

1 Введение

В металлургии для выплавки чугуна в качестве топлива используется кокс. Для эффективного управления процессом горения кокса необходимо знать кинетические характеристики его реагирования. Одним из современных инструментов определения кинетических свойств твёрдых топлив является прибор термогравиметрического анализа (ТГА), принцип

которого заключается в измерении убыли массы образца топлива, который находится на весах, расположенных в печи, при обдувании того газовой средой определённого состава и температуры. Из измерительных приборов в печи находятся лишь термопары для определения температуры образца. Поэтому для определения аэродинамических характеристик и концентрационных полей требуется прибегать к инструментам моделирования, наиболее функциональным из которых является метод вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Цель работы – численное исследование гидродинамических процессов при горении кокса каменного угля в приборе ТГА.

Для достижения поставленной цели надо решить следующие задачи:

1) подготовить CFD-модель внутреннего пространства печи прибора ТГА со всеми необходимыми подмоделями;

2) проанализировать полученные расчётные результаты по концентрационным полям газов в печи;

2 Описание работы прибора ТГА

Термический анализатор NETZSCH STA 449 F3 Jupiter позволяет выполнять измерения изменения массы и тепловых эффектов, при температурах до 1250 °С. Моделируемый эксперимент представлял собой процесс сжигания кокса Кузнецкого каменного угля марки Д в одном из двух тиглей. Второй тигель остаётся пустой, чтобы можно было сравнить температуру тигля с топливом и с пустым определить тепловой эффект реакции. На рисунке 1 показана схема держателя с тиглями. Сверху на тигли подается воздух. Снизу по трубке подается защитный газ – аргон. Печь нагревалась от 35 °С до 900 °С со скоростью 40 К/с.

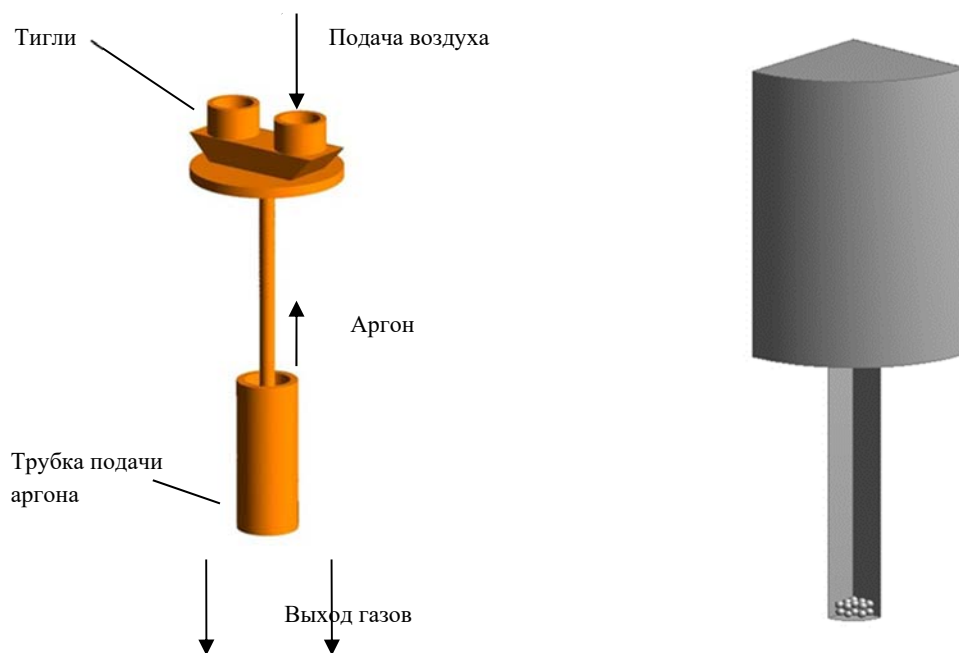


Рис. 1. Схема движения газов внутри печи прибора ТГА и геометрия сегмента тигля

3 Описание модели

Геометрия модели представляла собой внутреннее пространство печи, охватывающее сегмент тигля и среду вокруг него. Также в этом сегменте присутствуют частицы топлива с диаметром 0.05 мм. Сегмент имеет радиус 0.3 мм, и примерно составляет 0.013 от объема тигля. На основании данной геометрии построена сетка с 600 тыс. расчётных элементов, наиболее детальная часть которой представлена на рисунке 2.

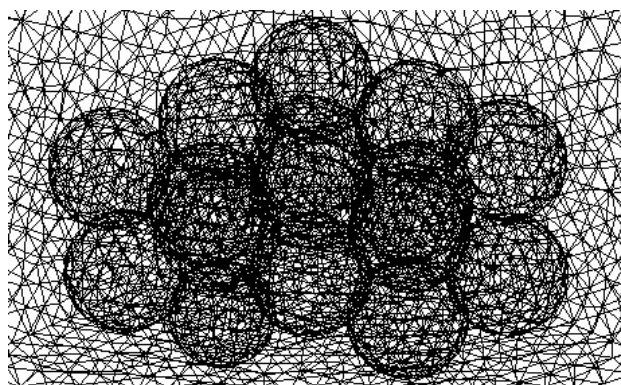


Рис. 2. Расчётная сетка вблизи тиглей

Массовый расход воздуха равен $4.537 \cdot 10^{-8}$ кг/с. Зона реагирования кокса угля с кислородом воздуха была представлена в виде поверхности частиц. Считалось, что горение проходит по реакции полного окисления углерода топлива кислородом воздуха до углекислого газа.

Для моделирования не потребовалось использования моделей турбулентности, так как число Рейнольдса составило 57 (ламинарное течение), что намного меньше критического. Смесь газов состояла из CO_2 , N_2 , O_2 . Абсолютное давление составляло 1 атм. Система изотермическая с температурами 491 °C, 700 °C и 907 °C. На стенках – условия прилипания.

4 Результаты

На рис. 3 приведены результаты моделирования концентрации CO_2 , а на рис. 4 – концентрации N_2 , а на рис. 5 – концентрации O_2 .

Как видно из рисунка 3, при температуре 491 °C горение только начиналось, т.к. концентрация CO_2 невелика на дне тигля, при температуре 700 происходит пик выделения газа, а при температуре 907 углерод практически весь выгорел. На рисунке 4 видно, что азот в начале процесса горения и в конце имел самую высокую концентрацию, за исключением пика горения, когда он вытеснялся CO_2 со дна тигля. А кислород начал поглощаться в начале горения, при температуре 700 °C концентрация кислорода практически равна нулю в пространстве тигля, что свидетельствует о диффузионном режиме горения, и в конце процесса кислород практически не расходуется.

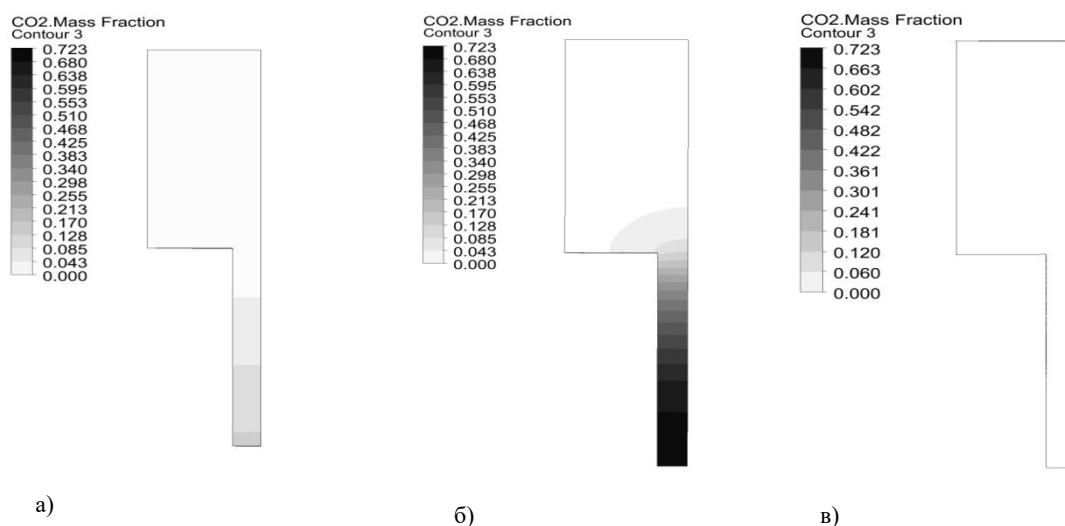


Рис. 3. Результаты моделирования концентрации CO_2 :
а) при температуре 491 °C; б) при температуре 700 °C; в) при температуре 907 °C

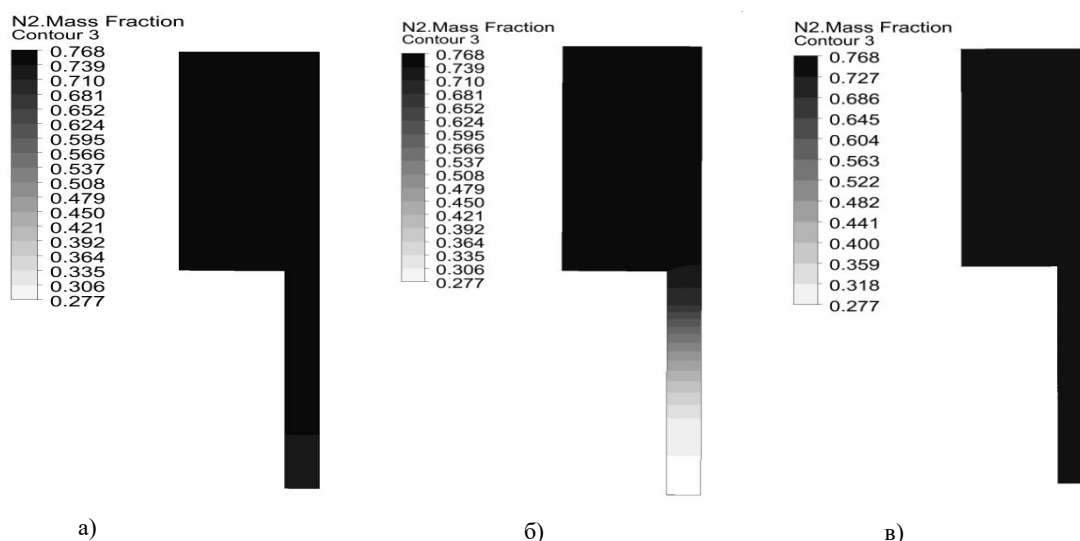


Рис. 4. Результаты моделирования концентрации N_2 :
а) при температуре 491 °C; б) при температуре 700 °C; в) при температуре 907 °C

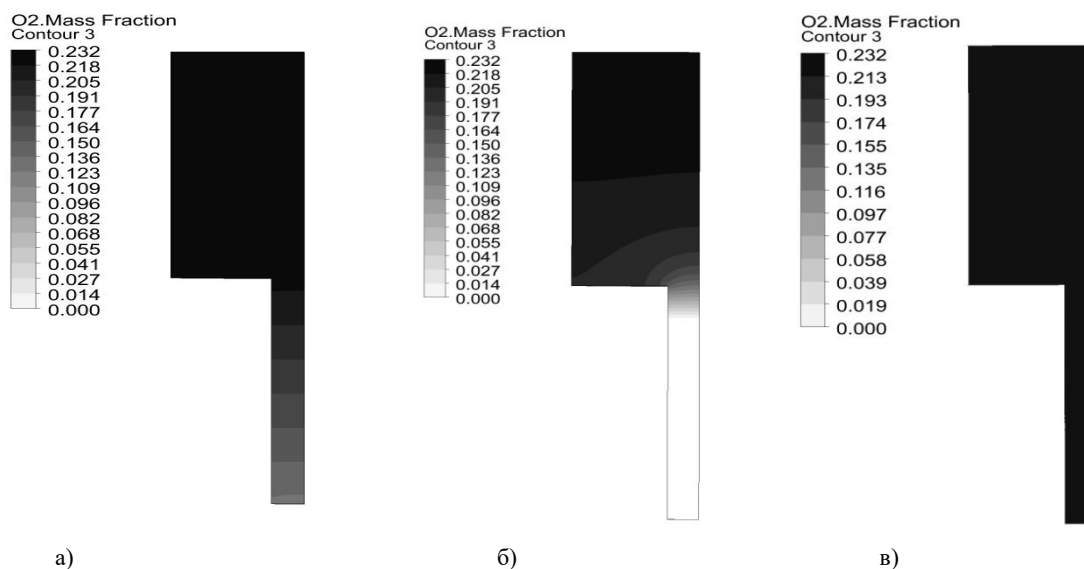


Рис. 5. Результаты моделирования концентрации O_2 :
а) при температуре 491 °C; б) при температуре 700 °C; в) при температуре 907 °C

5 Заключение

Термогравиметрический анализатор – сложный прибор, применяемый для получения данных о кинетике гетерогенных реакций, но он не дает понимания происходящих в нем гидрогазодинамических процессов. Численное моделирование позволяет выявить необходимые параметры работы печи и оптимизировать методику проведения экспериментов.

Сравнение расчётных результатов моделирования показало, как меняются концентрации газов в процессе горения.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524).

Список использованных источников

1. Рыжков А.Ф., Худякова Г.И., Осипов П.В. Абаймов Н.А. Исследование выгорания углей методом ТГА // Горение и плазмохимия, 2015, том 13, № 3. – С. 176–180.

2. Зубарев В.Н., Козлов А.Д., Кузнецов В.М., Сергеева Л.В., Спиридонов Г.А. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.

УДК 621.6.04

И. С. Парышев, В. Н. Королев

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ КВАЗИКАПИЛЛЯРНОСТИ В НЕПОДВИЖНОМ ПРОДУВАЕМОМ ЗЕРНИСТОМ СЛОЕ

Аннотация

Экспериментально исследован необычный эффект, заключающийся в том, что если трубку опустить в неподвижный продуваемый зернистый слой, то внутри трубки частицы слоя начинают интенсивно перемещаться вверх, вследствие чего высота слоя частиц в трубке значительно превышает высоту неподвижного слоя за ее пределами. Показано, что высота подъема и характер движения частиц напрямую зависят от внутреннего диаметра трубки и размера частиц слоя.

Ключевые слова: неподвижный зернистый слой; твердые частицы; трубка; дисперсная среда.

Abstract

The unusual effect, consisting that if a tube to lower in a motionless blown granular layer inside a tube of a particle of a layer intensively start to move upwards owing to what the height of a layer of particles in a tube considerably exceeds height of a motionless layer behind its limits is experimentally investigated. It is shown, that the height of rise and character of movement of particles directly depend on internal diameter of a tube and the size of particles of a layer.

Keywords: Motionless granular layer; firm particles; a tube; the disperse environment.

Если полый цилиндр (трубку) опустить в неподвижный продуваемый зернистый слой, то высота, на которую поднимается дисперсная среда внутри трубки, превосходит высоту неподвижного слоя в аппарате. Этот эффект внешне напоминает классическое явление капиллярности. Однако в данном случае правильнее говорить не о капиллярности, а о квазикапиллярности, так как классическое явление капиллярности связано с явлением поверхностного натяжения, возникающего между молекулами жидкости, находящейся в узкой трубке, и ее стенками. В зернистых средах это явление связано с тем, что соприкосновение сыпучего материала с жесткой стенкой нарушает случайную хаотическую структуру пристенного слоя и упорядочивает ее на глубину 3...4 диаметров частиц [1]. Это приводит к возрастанию гидравлического радиуса, т.е. уменьшению сопротивления и увеличению проходного сечения для газа [2].

Исследования явления квазикапиллярности в неподвижных продуваемых зернистых средах в литературе отсутствуют.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния внутреннего диаметра трубки, опущенной в неподвижный продуваемый зернистый слой, на характер и скорость движения дисперсной среды по трубке.

Исследование проводилось на установке квадратного сечения 0,1×0,1 м (рис. 1) состоящей из дутьевой камеры (7) с газораспределительным устройством (1), в качестве которого использовалась перфорированная решетка, на которую насыпались частицы корунда эквивалентным диаметром 0,52 мм. Под газораспределительную решетку подавался воздух со скоростью, не превышающей скорости начала псевдооживления частиц. В центре аппарата вер-